不同气候情景下中国沙棘的地理分布及动态变化预测

陈松清， 东红芳， 岳怡锋， 郝媛媛， 刘 新， 曹先宇， 马 骏
（甘肃农业大学草业学院，草业生态系统教育部重点实验室，国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心，甘肃 兰州 730070）

摘 要：探究影响中国沙棘分布的主导环境因子，模拟其潜在适生区，以期为中国沙棘的种植、资源保护和开发利用提供理论依据。采用接收者操作特征曲线及其曲线下面积评估MaxEnt模型精度，综合贡献率、置换重要值及刀切法筛选中国沙棘主导环境因子并判定其适生范围，应用MaxEnt模型模拟并预测中国沙棘当前及未来气候条件下的适生区及其动态变化。结果表明：(1) 模型精度较高（平均训练AUC=0.953），能够有效模拟中国沙棘的潜在分布。(2) 年降水量（325~650 mm）、海拔（1200~3850 m）、最冷季度平均温度（-7.25~1.25 ℃）、最干月份降水量（1~4 mm）是影响中国沙棘分布的主导环境因子。(3) 中国沙棘主要集中分布在甘肃、青海、四川、西藏、宁夏、陕西、山西、河南、河北及内蒙古地区，云南和贵州等地也有零星分布；未来气候改变，不仅迫使中国沙棘向西北方向高纬度、高海拔地区以及云贵高原地区扩张，而且使得东南方向低纬度、低海拔分布区明显收缩，但整体分布面积增大。海拔和水热条件是影响中国沙棘分布的主导因素，未来为应对气候变化，应将沙棘产业重心向西北中高海拔地区偏移，并对中国沙棘资源进行合理开发及利用，以实现该资源的可持续发展。

关键词：最大熵（MaxEnt）模型；中国沙棘；主导环境因子；分布区预测；适生区变化

气候变化是当前人类面临的重大挑战，人类活动所引起的温室气体增加可能会使全球地表温度上升约1.0~2.0 ℃[1]，从而对植物物种的分布产生影响，导致一些植物的分布范围减少甚至消失，同时使另外一些植物的分布范围扩张[2]。为了应对全球气候变化对生物物种适应性和地理分布的改变，研究物种的潜在地理分布对于制定生物多样性保护策略具有指导意义[3]。生态位模型利用分布数据和相关环境变量，能够通过一定的算法预测物种的潜在分布。最大熵模型（MaxEnt）在众多生态模型中，不仅具有操作简单、模型稳定、运行速度快且不容易出错等特点，还在物种现实生境模拟、主导环境因子筛选、环境因子对物种生境影响的定量描述方面展现出明显的优势[4-5]。因而，广泛应用于气候变化对物种分布影响、珍稀动植物保护、病虫害防治、良种引种等方面[6]。

中国沙棘（*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*）为胡颓子科（Elaeagnaceae）沙棘属（*Hippophae*）无皮组中鼠李沙棘的亚种，处于我国东南部湿润森林区、西北部草原荒漠区、青藏高寒植被区[7-8]，属于森林—草原过渡带成员，主要分布在西北、西南、华北和东北等环境恶劣、生态脆弱的区域[9]，受到气候、水热和光的制约，是我国境内分布最广泛、栽培面积最大的沙棘属植物[10]，同时是一类具有巨大开发潜力的经济作物和拥有生态效益、社会效益的先锋树种，如食品开发、生理保健、医药研制等方面的经济价值[11-12]，保持水土、改良土壤、防风固沙、生态修复等方面的生态价值[13]，美化环境、提供就业、提供“三料”等方面的社会价值[14]，即能为农村提供优良的燃料、饲料及肥料。总体来说，中国沙棘产业的

收稿日期：2023-09-07；修订日期：2023-11-29
基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目（202310733002）；国家自然科学青年基金项目（41907406）；甘肃农业大学科技创新基金项目（GAU-KYQD-2018-23）
作者简介：陈松清（2000-），男，硕士研究生，主要从事草地生态研究. E-mail: 17352091400@163.com
通讯作者：郝媛媛. E-mail: haoyy@gsau.edu.cn

发展取得了明显成效,为生态建设和产业发展提供了良好的示范。因此研究气候变化是否会改变未来中国沙棘地理分布?对中国沙棘资源进行针对性保护及可持续性开发具有一定参考意义,有助于推动中国的生态文明建设和乡村振兴[15]。

本研究基于中国沙棘分布的实际位点数据,采用MaxEnt模型,结合气候、地形及土壤等相关环境因子模拟当前及未来气候情景下中国沙棘的潜在分布及其适生区变化。该研究有助于进一步了解中国沙棘对生态环境的要求及其适应气候变化的能力,并为其种质资源繁育与利用及人工栽培提供理论参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 分布点数据 通过全球生物多样性信息网络GBIF(Global Biodiversity Information Facility, http://data.gbif.org)、中国数字植物标本馆CVH(Chinese Virtual Herbarium, http://www.cvh.ac.cn/)、中国植物志FRPS(Flora Reipublicae Popularis Sinicae, http://www.iplant.cn/frps)、中国自然标本馆CFH(Chinese Field Herbarium, https://www.cfh.ac.cn/)[16-17],以及相关文献[18-20]共获得305条中国沙棘分布信息,经去重等最终筛选有效信息167条,具体分布见图1。

1.1.2 环境因子数据 选取23个相关环境变量,包括19个气候因子、3个地形因子和1个土壤因子,其中气候数据和地形数据源自世界气候数据库(Worldclim),土壤数据源自联合国粮农组织数据库(FaoStat),所有数据分辨率均为30″,具体指标及其详细信息见表1。其中,未来气候数据选取第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的BCC-CSM2-MR作为我国未来的气候模式,排放路径选取BBC-CSM2-MR模型下的SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5的4种不同情景[21],并选用2021—2040年和2041—2060年两个时间段,预测未来40 a中国沙棘的分布及动态变化,以期为未来沙棘的种质资源繁育与利用及人工栽培提供参考。BBC-CSM2-MR模型能够对陆地区域极端气温指数及其变化趋势等进行模拟[22],是研究地区气候系统和预测未来气候变化的重要工具。

1.2 研究方法

1.2.1 模型运行及精度评价 将环境因子数据(ASCII格式)和中国沙棘地理分布数据(.csv格式)导入MaxEnt软件,勾选响应曲线反映环境因子适宜度范围和利用刀切法评价环境因子的重要性两个选项,输出类型使用Logistic[23],以建立中国沙棘地理分布与环境因子的关系模型。模型精度评价采

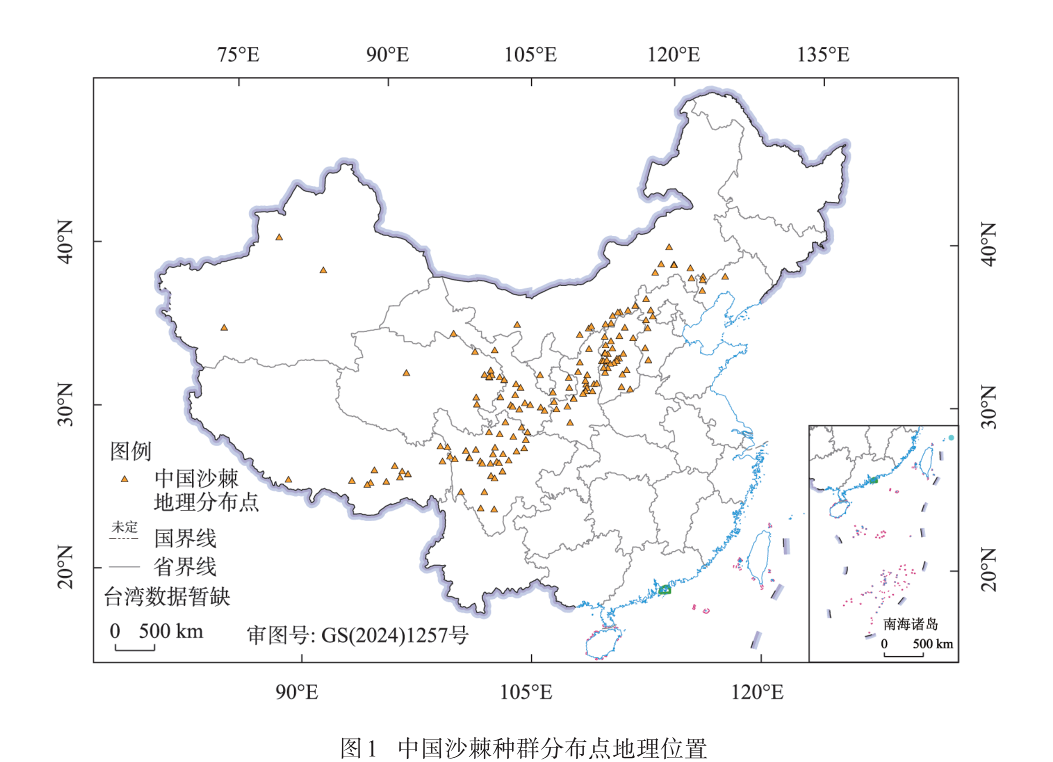


图1 中国沙棘种群分布点地理位置

Fig. 1 Geographical location of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* population distribution points in China

表1 环境因子指标及其详细信息

Tab. 1 Environmental factor indicators and their details

具体指标	环境因子	时间序列	数据来源
气候	Bio1(年平均气温)		世界气候数据库(Worldclim)
	Bio2(平均气温日较差)		
	Bio3(等温性)		
	Bio4(气温季节性变动系数)		
	Bio5(最热月份最高温度)		
	Bio6(最冷月份最低温度)		
	Bio7(气温年较差)		
	Bio8(最湿季度平均温度)	当前(1970—2000年)	
	Bio9(最干季度平均温度)	未来(2021—2040年)	
	Bio10(最暖季度平均温度)	未来(2041—2060年)	
	Bio11(最冷季度平均温度)		
	Bio12(年降水量)		
	Bio13(最湿月份降水量)		
	Bio14(最干月份降水量)		
	Bio15(降水量季节性变化)		
	Bio16(最干季度降水量)		
	Bio17(最湿季度降水量)		
	Bio18(最暖季度降水量)		
	Bio19(最冷季度降水量)		
地形	Elevation(海拔)	当前(1970—2000年)	世界气候数据库(Worldclim)
	Slope(坡度)		
	Aspect(坡向)		
土壤	Soil-type(土壤质地类型)	当前(1971—1981年)	联合国粮农组织数据库(FaoStat)

注:地形和土壤数据默认在未来预测时段内不发生变化;坡度、坡向及海拔基于数字高程模型提取。

用接收者操作特征曲线(ROC)和曲线下面积(AUC),其中,测试集:训练集=1:3,最大迭代次数500次,重复10次。当AUC∈[0.5,0.6]时,说明模型结果失败;AUC∈[0.6, 0.7],结果较差;AUC∈[0.7, 0.8],结果一般;AUC∈[0.8, 0.9],结果良好;AUC∈[0.9,1.0],结果极好[24]。

1.2.2 主导环境因子筛选及适生条件判定 由于气候变量之间存在交叉或潜在相关等不同程度相关性,首先利用MaxEnt进行预模拟,剔除贡献率小于1%的环境因子并进行Pearson相关性分析。当两环境因子间相关性≥|0.8|时,保留贡献率较大的环境因子,最终确定9个主要环境因子,并再次利用MaxEnt进行最终预测。最后,基于贡献率、置换重要值及刀切法综合考虑[25],筛选影响中国沙棘地理分布的主导环境因子,依据分布概率大于0.5,确定其适宜范围[26]。

1.2.3 适生区预测及变化分析 对当前和未来气候情景下中国沙棘的潜在分布区分别进行预测,利用自然间断点分级法,将其划分为高适生区[0.48—1)、中适生区[0.25—0.48)、低适生区[0.08—0.25)和非适生区[0—0.08)4个等级[27],并利用叠加分析工具分析其动态变化。

2 结果与分析

2.1 模型精度

模型重复运行10次后得到平均训练AUC=0.953(图2),最大训练AUC=0.959,最小训练AUC=0.945,平均测试AUC=0.932,最大测试AUC=0.952,最小测试AUC=0.885。当AUC值越接近1时,物种的地理分布与环境变量越相关,模型预测结果越准确。本次模型预测AUC值均达到良好及以上,说明预测结果可靠,可为后续分析提供准确的判断。

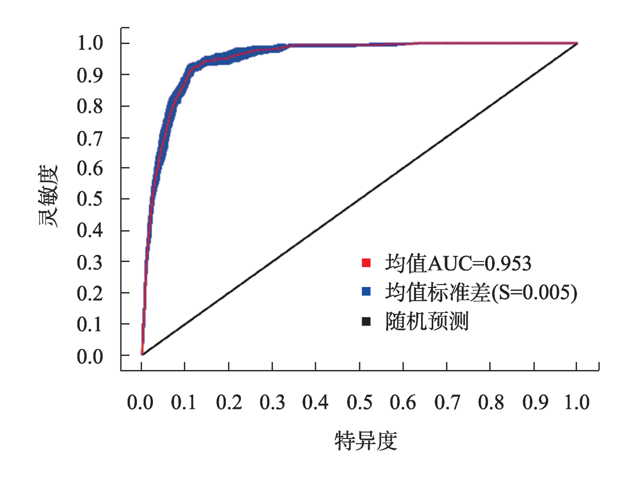


图2 中国沙棘预测结果ROC检验

Fig. 2 ROC test of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* prediction results

2.2 主导环境因子

2.2.1 筛选环境因子 从贡献率来看(表2),对中国沙棘分布影响较大的环境因子主要为年降水量(25.4%)、海拔(24.7%)、最冷季度平均温度(22.4%)、最干月份降水量(17.0%);置换重要值来看,影响较大的环境因子主要为年降水量(29.6%)、最干月份降水量(19.2%)、海拔(18.3%)、最冷季度平均温度(12.3%);由刀切法结果可知(图3),得分较高的环

表2 各环境变量对中国沙棘分布的重要性分析

Tab. 2 Analysis of the importance of various environmental variables on the distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*

环境变量	描述	贡献率/%	置换重要值/%
Bio12	年降水量/mm	25.4	29.6
Elevation	海拔/m	24.7	18.3
Bio11	最冷季度平均温度/℃	22.4	12.3
Bio14	最干月份降水量/mm	17.0	19.2
Bio4	气温季节性变动系数	2.8	9.2
Aspect	坡向/(°)	2.7	1.5
Bio2	平均气温日较差/℃	2.4	6.2
Slope	坡度/(°)	1.7	2.2
Bio15	降水量季节性变化/mm	0.9	1.5

境因子分别为最冷季度平均温度、年降水量、海拔、最干月份降水量。

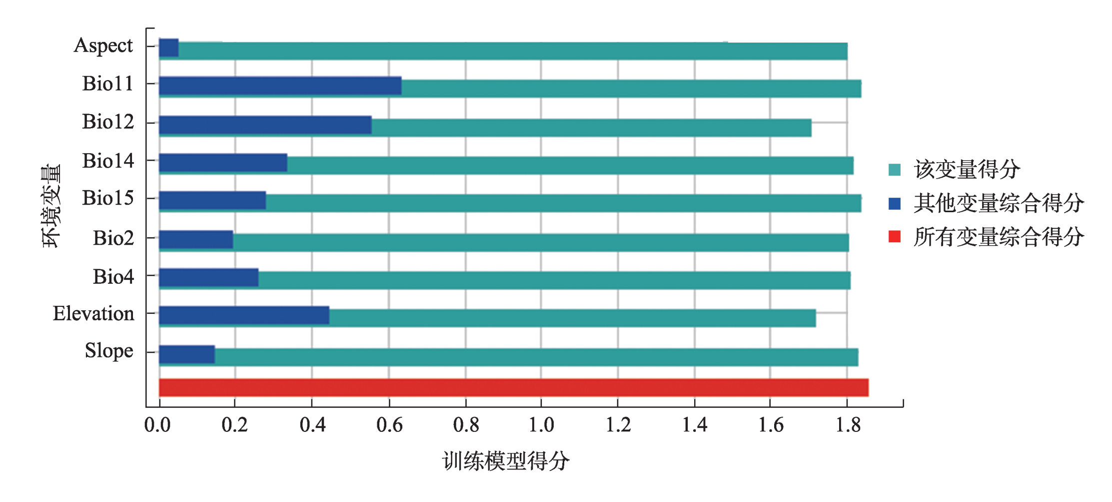
最终综合三者考虑确定年降水量、海拔、最冷季度平均温度、最干月份降水量为影响中国沙棘分布的主导环境因子。

2.2.2 判定适宜范围 从中国沙棘分布概率与上述4个环境变量之间的关系响应曲线(图4)可以看出，中国沙棘对年降水量的适应范围为325~650 mm，475 mm时达到生存峰值(图4a)；其对最冷季度平均温度的适应范围为−7.25~1.25 ℃(图4c)，当最冷季度平均温度约为−2.5 ℃时，其生存概率达到最高值；对海拔的适应范围为1200~3850 m(图4b)，当海拔高度达到3375 m时，分布概率达到最高点，此时海拔高度为中国沙棘最适宜的生存条件；当最干月份降水量约为2.5 mm时达到生存峰值，1~4 mm时最适生存(图4d)。

2.3 潜在分布区

2.3.1 当前气候情景 由中国沙棘潜在分布(图5)及潜在适宜分布区面积统计(表3)可知，当前气候情景下中国沙棘高适生区面积约41.9×10⁴ km²，主要分布在甘肃东部和南部、青海东北部、陕西北部以及山西的大部分区域，河北、内蒙古、四川、西藏及宁夏也有少量分布；中适生区面积约53.6×10⁴ km²，主要分布在内蒙古中南部、河北北部、宁夏南部、陕西东南部、河南西部以及西藏和四川的部分地区；低适生区面积约92.6×10⁴ km²，主要分布在甘肃中部、内蒙古南部、青海、四川、西藏等地；非适生区面积约770.8×10⁴ km²，除以上区域外均为非适生区，主要在中国南方地区、东北三省和新疆大部分区域及青海和甘肃西部。

2.3.2 未来气候情景 2021—2040年，SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5排放情景下(图6)，适生区总面积分别为242.0×10⁴ km²、511.6×10⁴ km²、178.6×10⁴ km²和251.8×10⁴ km²，较当前情景分别变化28.7%、171.9%、−5.1%和34.0%；2041—2060年4种排放情景下，适生区总面积分别为372.4×10⁴ km²、154.0×10⁴ km²、259.1×10⁴ km²和155.8×10⁴ km²，较当前情景分别变化97.9%、−18.1%、37.7%和−9.8%(表4)。未来随着气候的变化，中国沙棘仍然分布在当前所在省份，但在2021—2040年高适生区面积在SSP2-4.5情景下增长，其余3种情景下均大幅度



注：图中环境变量含义见表1。

图3 各环境因子对中国沙棘潜在分布模型的Jacknife检验得分

Fig. 3 Jacknife test scores for the potential distribution model of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* with respect to various environmental factors

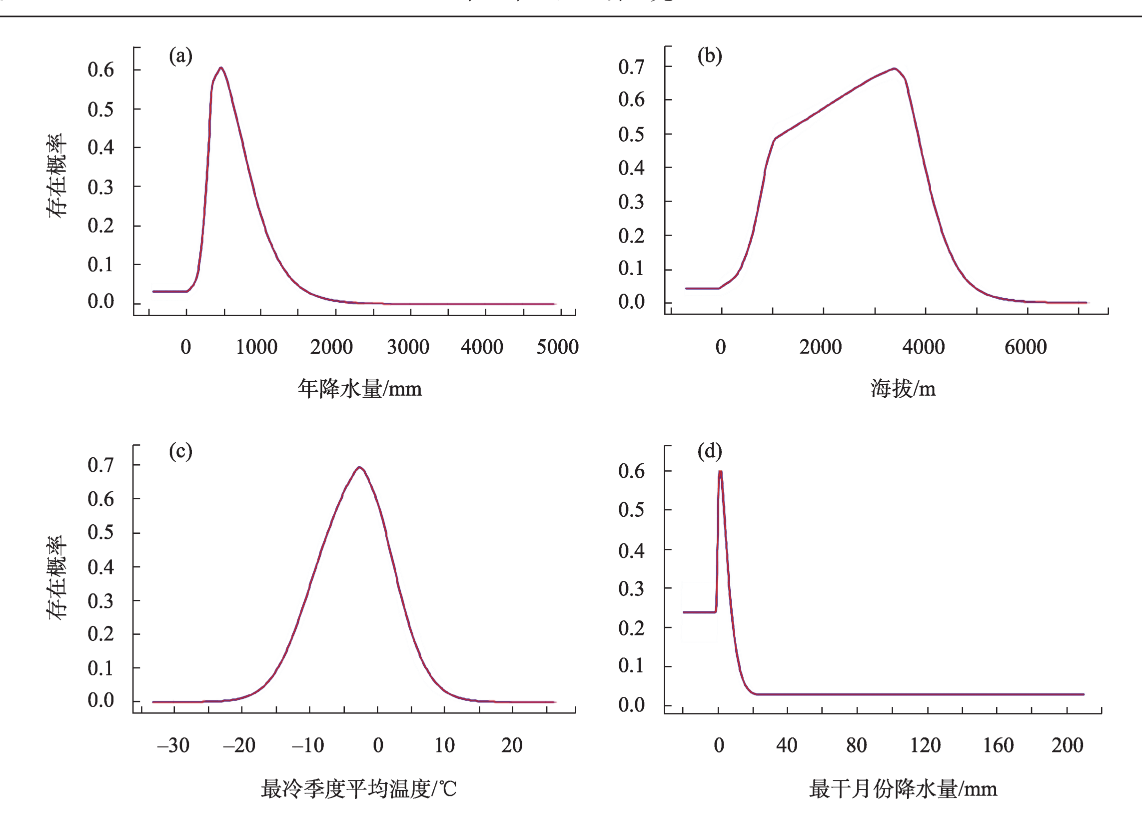


图4 中国沙棘主导环境因子响应曲线

Fig. 4 Response curve of environmental factors dominated by *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*

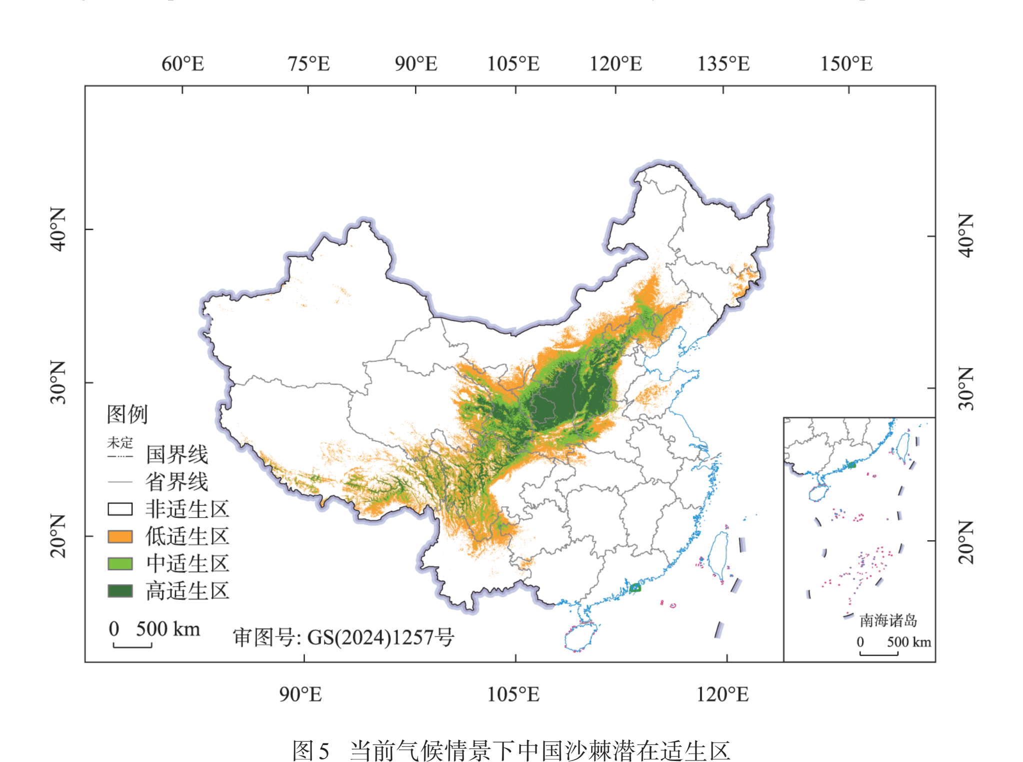


图5 当前气候情景下中国沙棘潜在适生区

Fig. 5 Potential habitat areas for *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* under current climate scenarios

减少；中适生区面积在SSP1-2.6、SSP2-4.5情景下增加，在SS3-7.0、SSP5-8.5情景下减少；低适生区面积在4种情景下均增长。2041—2060年里，高适生区面积在4种气候情景下快速减少，几近消失；中适生区面积在SSP1-2.6情景下增长，其余3种情景下减少，低适生区面积4种情景下均增长。总体看来，

表3 潜在适宜分布区面积统计

Tab. 3 Statistical of potential suitable distribution areas

适生等级	预测值	分布面积/10^4 km^2
高适生区	0.48~1.0	41.9
中适生区	0.25~0.48	53.6
低适生区	0.08~0.25	92.6
非适生区	0.00~0.08	770.8

维持当前社会经济和科学发展现状会使中国沙棘出现短期的快速繁殖与扩张，但持续处于这种发展状况会使其逐渐走向衰退；可持续发展途径下高适生区面积虽在明显减少，但其中、低适生区面积均在大幅增加，有稳定的上升趋势，这有利于其生存并进一步繁殖扩散；另外两种发展途径下中、高适生区面积持续走向下降趋势，虽其低适生区面积在反向增长，但主要是由中、高适生区衰退而来。

2.3.3 动态变化 未来，随着气候的变化，中国沙棘的分布范围也随之发生改变，根据变化趋势可将其分为稳定区、扩张区、收缩区3个等级（图7）。总体来看，稳定区主要位于内蒙古中南部、西藏东南部、甘肃东南部、青海东部、宁夏、陕西、山西、四川、河北西北部、云南南部、吉林的部分地区；扩张区主要位于稳定区的西北方向，如新疆、青海西部、西藏西北部、内蒙古北部、黑龙江、吉林，另外也有向云贵高原区域扩张；收缩区主要位于稳定区的东南方向，如辽宁、河北、山东、河南、湖北、四川，但其余地区也有小程度收缩。由此可得，气候改变，迫使中国沙棘朝着西北方向高纬度、高海拔地区以及云贵高原地区扩张，同时又使东南方向低纬度、低海拔分布区发生明显收缩。

3 讨 论

3.1 模型可靠性分析

MaxEnt模型的预测精度决定了预测结果的可靠性，为能否展开后续研究和分析提供了重要依据。此次模型运行平均训练AUC=0.953，符合对MaxEnt模型精度的极好评价标准（0.9≤AUC<1.0）[24]，参与建模的虽只有167个分布点，远小于张晓玮等[28]的328个分布点，但MaxEnt模型对样本需求量较低，只要少量的分布点就能达到较好的预测[6]。另外MaxEnt模型是通过地理分布信息与相应环境因子数据进行预测[4]，因此环境因子的选择以及环境变量之间的共线性均会影响到预测结果的准确性。此次实验在19个气候因子的基础上还加入了地形和土壤因子，同时进行双变量的Pearson相关性分析，剔除相关性较高的因子，避免了环境变量间的过度拟合，因此预测结果更加可靠。然而，一些数据年代久远，存在笔迹不清晰，拍照模糊的情况，这可能对模型建立造成困难，同时分布点间距过近，如小于5 km时，也会造成过度拟合的影响[29]。此外，因人类活动、物种的种间种内竞争、覆土厚度[30]以及初植密度[31]等都会影响中国沙棘的生存和分布。因此，之后的研究不仅要考虑分布点之间的空间关联性，还可以加入人为因素、生物因素以及其他非生物因素等，使MaxEnt模型预测结果更加精准。

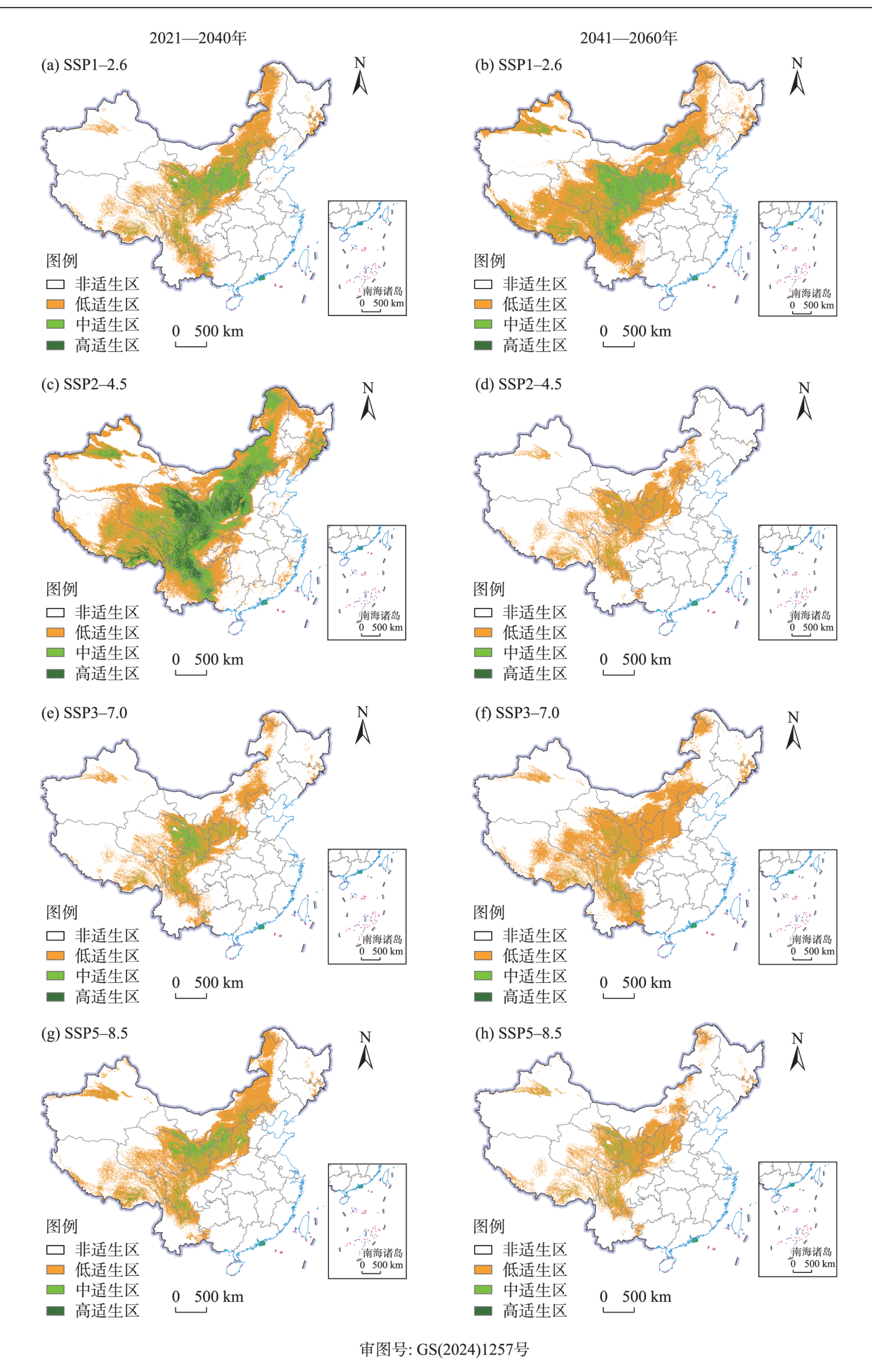
3.2 环境因子对中国沙棘分布的影响

中国沙棘的地理分布主要受到海拔和水热条件的制约。关键的环境因素包括年降水量（325~650 mm）、海拔（1200~3850 m）、最冷季度平均温度（−7.25~1.25 ℃）、最干月份降水量（1~4 mm）等，顾恒等[32]研究表明海拔（1000~4000 m）和年降水量（400~800 mm）是影响中国沙棘生长的重要限制因子，这与本文结果大致相同。最冷季度平均温度是影响中国沙棘分布的重要因子，与王瑞雪等[33]研究认为温度是限制沙棘属植物分布的重要因子一致，这是因为适宜的温度决定了中国沙棘能否安全越冬。中国沙棘具有耐寒的特点，其在近−35 ℃仍能存活，其雌雄异株授粉和兼性营养繁殖保证了其具

表4 未来4种不同情景下中国沙棘适生区面积变化

Tab. 4 Changes in the area of suitable habitats for *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* under four different scenarios in the future

适生区面积变化/%	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
	2021—2040年	2041—2060年	2021—2040年	2041—2060年	2021—2040年	2041—2060年	2021—2040年	2041—2060年
低适生区	97.1	197.2	198.8	57.3	62.4	167.0	126.7	50.2
中适生区	10.1	79.8	248.7	−84.4	−47.5	−77.7	−21.9	−68.8
高适生区	−98.7	−98.0	14.3	−100.0	−99.8	−100.0	−99.3	−99.9
总适生区	28.7	97.9	171.9	−18.1	−5.1	37.7	34.0	−9.8



审图号: GS(2024)1257号

图6 未来气候情景下中国沙棘潜在适生区

Fig. 6 Potential suitable areas of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* under future climate scenarios

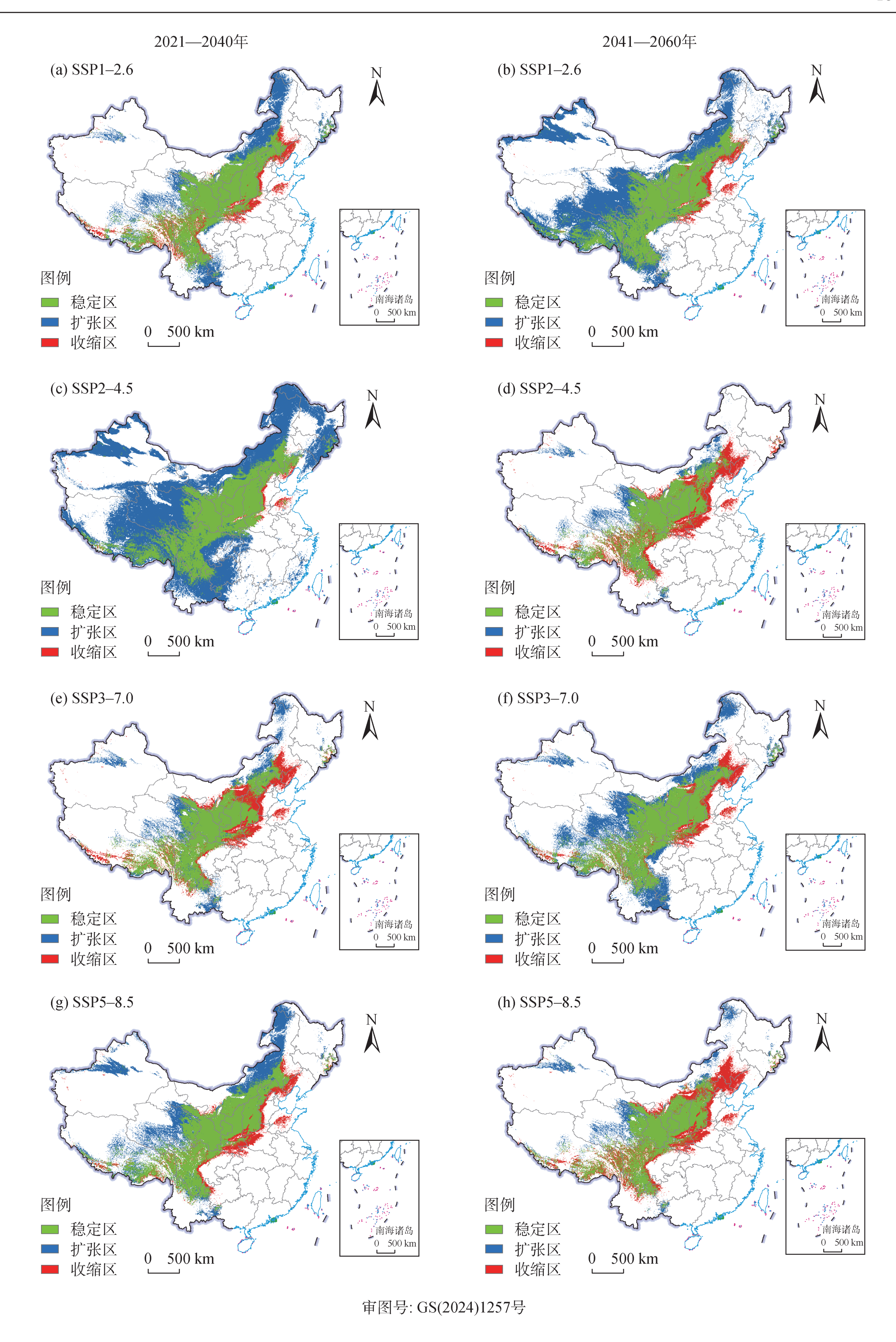


图7 未来气候情景下中国沙棘潜在适生区动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of potential suitable areas of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* under future climate scenarios

有抵抗严酷环境的能力。水分条件是该物种存活、生长和繁殖的主要因素,这与本文预测结果最干月份降水量、年降水量是其主导因素相一致,验证了王瑞雪[33]、代光辉等[34]所说的中国沙棘是一种喜水、耐旱的阳性落叶树种。虽然本模型中加入了土壤质地类型、坡度和坡向数据,可结果显示三者对中国沙棘分布的影响较海拔、水热条件小,但坡向对沙棘生长仍然比较重要,阴坡更适合沙棘生长[35]。

3.3 不同气候条件下中国沙棘的分布

中国沙棘分布主要集中在甘肃、青海、四川、西藏、宁夏、陕西、山西、河南、河北及内蒙古地区,云南、贵州等也有零星分布,这与张晓玮等[28]模拟结果基本一致,同时与苏锦松等[9]研究的中国沙棘适宜区主要位于黄土高原和青藏高原的边缘地区呈带状分布,与横断山脉东北侧的分布带相吻合。本实验还在目前分布模拟的基础上进行了未来分布预测。未来,人为活动引发的温室气体增加致使全球变暖,导致各种极端天气及自然灾害出现的频率会升高[36],是否影响到中国沙棘潜在分布,非常值得探讨。通过模拟未来两个时期、四种气候情景下中国沙棘的分布,得到潜在适生区面积表现出不同程度的变化,SSP1-2.6情景下中国沙棘总面积持续稳步增长;SSP2-4.5情景下其面积先大幅增长,后急剧减少;SSP3-7.0情景下先小幅减少,后开始增长;SSP5-8.5情景下先增后减。气候变化虽然导致中国沙棘生存环境发生极大变化,使其分布密度降低,但在未来40 a里其总面积却逆向增长,证明了其有极强的抗逆性。在生存条件恶劣的环境下,也能顽强生长,进行繁殖扩张,这也证实了赵丽辉等[37]所说的中国沙棘具有较强的生态适应性。还有就是在2021—2040年期间SSP2-4.5情景最适合中国沙棘的生长,可能是维持当前社会经济和科学发展趋势下,中等程度的辐射和排放量较能满足中国沙棘的生长需要;2041—2060年期间,SSP1-2.6情景更适合中国沙棘的生长,可能是继续维持当前发展趋势及较高的排放情景,会造成大气CO_2浓度持续走高及辐射强迫加大,超出了中国沙棘的适应范围,从而对其生存产生胁迫,此时低减缓压力和低辐射强迫下的可持续发展路径就成了最适合中国沙棘生存的选择。同时,中国沙棘将朝着西北方向高纬度和高海拔地区以及云贵高原地区扩张,东南方向低纬度和低海拔地区收缩。BCC-CSM2-MR模型[38]在模拟陆地表面变量的空间分布和变化方面表现良好。然而,模型在模拟强度方面可能存在一些偏差,这可能会对中国沙棘的分布产生一定的影响。因此,在使用该模型进行预测时,需要对其结果进行评估和修正,以提高预测的准确性。

4 结 论

(1) ROC曲线平均训练AUC>0.9,说明MaxEnt模型结果预测良好,能够准确模拟中国沙棘的分布情况,并为开展后续研究与分析提供重要依据。

(2) 影响中国沙棘分布的主导环境因子为年降水量(325~650 mm)、海拔(1200~3850 m)、最冷季度平均温度(-7.25~1.25℃)、最干月份降水量(1~4 mm)。

(3) 当前中国沙棘分布区域涉及甘肃、青海、四川、西藏、宁夏、陕西、山西、河南、河北、内蒙古、云南及贵州等省份,高、中和低适生区面积分别为41.9×10^4 km^2、53.6×10^4 km^{2}和92.6×10^4 km^2。

(4) 未来,中国沙棘在新疆、青海、西藏、甘肃、内蒙古及云南、贵州、广西三省交界区域的分布面积增加,在辽宁、河北、山西、河南、陕西、湖北、四川、山东等地区的分布面积减少,这主要是受降水与温度变化的影响。研究结果对未来沙棘产业的布局、资源保护及可持续性开发具有一定参考意义。

参考文献(References):

[1] 刘泽淼, 黄贤金, 卢学鹤, 等. 共享社会经济路径下中国碳中和路径预测[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2189-2201. [Liu Zemiao, Huang Xianjin, Lu Xuehe, et al. China's carbon neutrality path prediction under the shared social economic paths[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2189-2201.]

[2] 曹策, 蒋昕. 植物分布对气候变化的响应[J]. 绿色科技, 2017(16): 111-113. [Cao Ce, Jiang Xin. Response of plant distribution to climate change[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(16): 111-113.]

[3] 陈禹锦, 罗喻才, 于芬, 等. 气候变化情景下毛竹潜在分布及动态预测[J]. 世界竹藤通讯, 2021, 19(3): 5-14. [Chen Yujin, Luo Yucai, Yu Fen, et al. Potential distribution and dynamic prediction of *Phyllostachys edulis* under the scenarios of climate change[J]. World Bamboo and Rattan, 2021, 19(3): 5-14.]

[4] 麻雯迪, 李世宗. MaxEnt模型国内外研究进展及其在不同气候背景与区域尺度下的应用[J]. 林业建设, 2023(2): 32-40. [Ma Wendi, Li Shizong. Development of maximum entropy model at home and abroad and its applications in different climatic backgrounds and regional scales[J]. Forestry Construction, 2023(2): 32-

40.]

[5] 赵艳芬, 潘伯荣. 气候变化情景下革苞菊属在中国的潜在地理分布[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 949-957. [Zhao Yanfen, Pan Borong. Potential geographical distributions of *Tugarinovia* in China under climate change scenarios[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 949-957.]

[6] 李响, 张成福, 贺帅, 等. MaxEnt模型综合应用研究进展分析[J]. 绿色科技, 2020(14): 14-17. [Li Xiang, Zhang Chengfu, He Shuai, et al. Research progress analysis on the comprehensive application of MaxEnt model[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(14): 14-17.]

[7] 高佩, 马亚琼, 何永超, 等. 中国沙棘根际固氮菌的分离、鉴定及促生能力比较[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2024, 53(4): 522-531. [Gao Pei, Ma Yaqiong, He Yongchao, et al. Isolation, identification and growth-promoting ability of azotobacter in rhizosphere of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 53(4): 522-531.]

[8] 廉永善, 陈学林. 沙棘属植物的系统分类[J]. 沙棘, 1996, 9(1): 15-24. [Lian Yongshan, Chen Xuelin. Systematic classification of *Hippophae rhamnoides*[J]. Seabuckthorn Hippophae, 1996, 9(1): 15-24.]

[9] 苏锦松, 赵彩云, 文检, 等. 中国沙棘叶黄酮类成分与生态因子相关性及其生态适宜性研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(10): 1865-1870. [Su Jinsong, Zhao Caiyun, Wen Jian, et al. Correlation between flavonoids contents in *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* leaf and ecological factors, and ecological suitability analysis of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(10): 1865-1870.]

[10] 陈学林, 廉永善. 沙棘属植物的分布格局及其成因[J]. 沙棘, 2007, 20(4): 1-5. [Chen Xuelin, Lian Yongshan. Distribution patterns of *Hippophae rhamnoides* plants and their genesis[J]. Seabuckthorn Hippophae, 2007, 20(4): 1-5.]

[11] 胡晓霞, 吉小敏, 梁康贤, 等. 沙棘产业与新疆区域经济的增长[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 71-75. [Hu Xiaoxia, Ji Xiaomin, Liang Kangxian, et al. Industry of *Hippophatae rhamnoides* and the regional economic increase in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 71-75.]

[12] 陈奕璇, 郭佳琦, 关文强, 等. 沙棘综合开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 201-207. [Chen Yixuan, Guo Jiaqi, Guan Wenqiang, et al. Research progress on comprehensive development and utilization of Sea Buckthorn[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 201-207.]

[13] 王举位, 张征, 安宝利, 等. 砒砂岩区沙棘林生态服务功能价值评估[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 198-204. [Wang Juwei, Zhang Zheng, An Baoli, et al. Evaluation of Seabuckthorn forest ecosystem services value in soft rock region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 198-204.]

[14] 张耀, 张成榆, 王彦裕, 等. 沙棘的克隆生长及其生态经济意义[J]. 国际沙棘研究与开发, 2009, 7(2): 24-30. [Zhang Yao, Zhang Chengyu, Wang Yanyu, et al. Ecological and economic significance of clonal growth of Seabuckthorn[J]. Water Resources Development and Management, 2009, 7(2): 24-30.]

[15] 吴立仁. 黑龙江省沙棘发展概况及对策[J]. 北方园艺, 2010(16): 205-207. [Wu Liren. Development general situation and countermeasure of Sea Buckthorn in Heilongjiang Province[J]. Northern Horticulture, 2010(16): 205-207.]

[16] 张林, 张云玲, 马松梅, 等. 准噶尔盆地大赖草分布格局及关键因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 863-871. [Zhang Lin, Zhang Yunling, Ma Songmei, et al. Distribution pattern and driving mechanisms of the sand plant *Leymus racemosus* in the Junggar Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 863-871.]

[17] 张华纬, 赵健, 李志鹏. 基于GIS的入侵生物适生区预测——以桔小实蝇为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 59-64. [Zhang Huawei, Zhao Jian, Li Zhipeng. Prediction of suitable establishment areas of invasive species based on GIS: Take *Bactrocera dorsalis* (Hendel) as an example[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 59-64.]

[18] 黄铨. 中国沙棘的地理变异[J]. 沙棘, 2003, 16(1): 8-13. [Huang Quan. Geographical variation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in China[J]. Seabuckthorn Hippophae, 2003, 16(1): 8-13.]

[19] 强大宏, 艾宁, 刘长海, 等. 煤矿复垦区沙棘人工林土壤水分时空分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 82-87. [Qiang Dahong, Ai Ning, Liu Changhai, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of soil moisture in Seabuckthorn plantations in coal mine reclamation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 82-87.]

[20] 李玲, 李森, 邓东周, 等. 岷江上游中国沙棘土壤碳氮磷对海拔的响应及其计量特征[J]. 西南农业学报, 2019, 32(5): 1098-1103. [Li Ling, Li Sen, Deng Dongzhou, et al. Effect of Elevation on soil nutrient content and stoichiometric characteristics under *Hippophae rhamnoides* L. shrubs in upper Min River[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(5): 1098-1103.]

[21] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525. [Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519-525.]

[22] 吴统文, 宋连春, 李伟平, 等. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用[J]. 气象学报, 2014, 72(1): 12-29. [Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. An overview on progress in Beijing climate center climate system model—Its development and application to climate change studies[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(1): 12-29.]

[23] 秦委, 张虹, 杨明霞, 等. 基于MaxEnt模型和ArcGIS的东南茜草潜在分布研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(5): 1-4. [Qin Wei, Zhang Hong, Yang Mingxia, et al. Study on potential distribution of *Rubia argyi* (Levl. et Van.) Hara ex L. A. Lauener et D. K.

based on MaxEnt model and ArcGIS[J]. China Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2022, 29(5): 1–4.]

[24] 景志贤, 李梦, 张小波, 等. 基于全球气候数据和MaxEnt模型的辣木全球气候适宜区研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(8): 1352–1356. [Jing Zhixian, Li Meng, Zhang Xiaobo, et al. Global climatic region suitable for *Moringa oleifera*: An exparation based on global climate data and MaxEnt model[J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(8): 1352–1356.]

[25] 潘雅楠, 张虹, 章鹏飞, 等. 基于MaxEnt模型和ArcGIS的杠板归适宜分布区预测[J]. 中国中医药信息杂志, 2021, 28(7): 1–4. [Pan Yanan, Zhang Hong, Zhang Pengfei, et al. Prediction of suitable distribution area of *Polygonum perfoliatum* L. based on MaxEnt model and ArcGlS[J]. China Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2021, 28(7): 1–4.]

[26] 贺晓慧, 司建华, 赵春彦, 等. 西藏沙棘(*Hippophae thibetana*)潜在地理分布及其对未来气候变化的响应模拟[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 101–109. [He Xiaohui, Si Jianhua, Zhao Chunyan, et al. Potential distribution of *Hippophae thibetana* and its predicted responses to climate change[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 101–109.]

[27] 唐燕, 赵儒楠, 任钢, 等. 基于MaxEnt模型的中华枸杞潜在分布预测及其重要影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 23–32. [Tang Yan, Zhao Runan, Ren Gang, et al. Prediction of potential distribution of *Lycium chinense* based on MaxEnt model and analysis of its important influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 23–32.]

[28] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 等. 基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1420–1428. [Zhang Xiaowei, Jiang Yumei, Bi Yang, et al. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1420–1428.]

[29] Dong P, Wang L, Qiu D, et al. Evaluation of the environmental factors influencing the quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* based on HPLC and the Maxent model[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 697–697.

[30] 曹子林, 王挺, 王晓丽, 等. 覆土厚度对中国沙棘幼苗出土及生长的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(5): 738–743. [Cao Zilin, Wang Ting, Wang Xiaoli, et al. Effects of covering soil thickness on seedling emergence and growth of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(5): 738–743.]

[31] 刘丹一. 初植密度对中国沙棘克隆生长的影响规律[D]. 昆明: 西南林业大学, 2013. [Liu Danyi. Infiuence Rhythm of Planting Density on Clonal of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis*[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2013.]

[32] 顾恒, 张浩, 陈雏, 等. 青藏高原中国沙棘的资源分布格局及其影响因素[J]. 国际沙棘研究与开发, 2008, 6(3): 10–16. [Gu Heng, Zhang Hao, Chen Chu, et al. Natural Distribution of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi. in Qinghai-Tibetan Plateau and its relationships with main environmental factors [J]. Water Resources Development and Management, 2008, 6 (3): 10–16.]

[33] 王瑞雪. 中国沙棘谱系地理学研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013. [Wang Ruixue. Phylogeography of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.]

[34] 代光辉, 李根前, 李甜江, 等. 水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 1–8. [Dai Guanghui, Li Genqian, Li Tianjiang, et al. Effects of water conditions on the growth and population stability of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 1–8.]

[35] 景宏伟, 李跃才, 丁宁. 中国沙棘种群在沙漠高速公路中的生态适应性研究[J]. 公路, 2007(8): 199–202. [Jing Hongwei, Li Yuecai, Ding Ning. A Study on ecological adaptation of *Hippophae Rhamniodes* L. subsp. *Sinensis* population in desert expressway [J]. Highway, 2007(8): 199–202.]

[36] Majid A. Critical findings of the sixth assessment report (AR6) of working Group I of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) for global climate change policymaking a summary for policymakers (SPM) analysis[J]. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 2023, 15(5): 652–670.

[37] 赵丽辉, 黄国辉, 聂小兰, 等. 不同沙棘品种的抗逆性与形态特性研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(4): 70–74. [Zhao Lihui, Huang Guohui, Nie Xiaolan, et al. Resistance and morpholoolgical studies on differ *Hippophea* sps[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2002, 34 (4): 70–74.]

[38] 谭洁, 黄安宁, 史学丽, 等. BCC-CSM2-MR模式对中国陆面过程模拟能力评估[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1335–1347. [Tan Jie, Huang Anning, Shi Xueli, et al. Evaluating the performance of BCC-CSM2-MR model in simulating the land surface processes in China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1335–1347.]

Geographical distribution and dynamic change prediction of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* under different climate scenarios

CHEN Songqing, DONG Hongfang, YUE Yifeng, HAO Yuanyuan,
LIU Xin, CAO Xianyu, MA Jun
(Key Laboratory of Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, College of Prataculture, Gansu Agricultural University, National Engineering Research Center for Prevention and Control of Alpine Grassland Pest Pest in Forestry and Grassland, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Explore the dominant environmental factors affecting the distribution of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* and simulate its potential suitable distribution areas, to provide a theoretical basis for the cultivation, conservation, and development of its wild resources. Methods: The working characteristic curve and the area under the curve of the subject were used to evaluate the accuracy of the model. The dominant environmental factors were screened by comprehensive contribution rate and the knife cutting method and their suitable range were determined; The MaxEnt model was applied to simulate and predict the suitable (growth) areas and their dynamic changes under current and future climatic conditions. Results: (1) The model accuracy was high (AUC=0.953), which can effectively simulate the potential distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis*. (2) Annual precipitation (325−650 mm), altitude (1200−3850 m), the average temperature during the coldest season (−7.25−1.25 ℃), and precipitation in the driest month (1−4 mm) were the leading environmental factors affecting its distribution. (3) It was mainly concentrated in Gansu, Qinghai, Sichuan, Xizang, Ningxia, Shaanxi, Shanxi, Henan, Hebei, and Inner Mongolia with sporadic occurrences in Yunnan and Guizhou; future climate change will not only force its expansion to the northwest high latitude, high-altitude area, and the Yunnan-Guizhou plateau but also remarkably shrunk the southeast low latitude and low altitude distribution area; the overall distribution area increased. Altitude and hydrothermal conditions were the leading factors affecting the distribution of *H. rhamnoides* subsp. *sinensis.* To cope with future climate change, the focus of its industry should be shifted to the northwest, middle, and high-altitude areas, and the reasonable development and utilization of its resources should be carried out to achieve sustainable development.

Keywords: MaxEnt model; *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*; dominant environmental factors; distribution area prediction; changes in suitable habitat.